

# Vom Schall zum Ton

Akustik-Serie Teil 4

## Elektroakustische Wandler – Prinzipien und ihre Gesetze

Elektroakustische Wandler dienen zur Umwandlung von elektrischer Energie in Schallenergie (= Schallsender, z. B. Lautsprecher) oder zur Umwandlung von Schallenergie in elektrische Energie (= Schallempfänger, z. B. Mikrofone oder Hydrofone). Diese Umwandlung erfolgt bei der Mehrheit der Wandler unter Zwischenschaltung eines schwingfähigen mechanischen Systems, dessen Hauptbestandteil bei nahezu allen Luftschallwandlern eine Membran bildet, die zu erzwungenen Schwingungen angeregt wird.

### Am Anfang war die Kohle

Man unterscheidet zwischen reversiblen und irreversiblen Schallwandlern. Reversible Wandler können in beiden Richtungen betrieben werden, d. h. sowohl als Schallsender als auch als Schallempfänger. Irreversible Schallwandler sind dagegen nur in einer Richtung betriebsfähig, z. B. Kohlekörnermikrofone, wie sie in der Anfangszeit der Fernsprechtechnik (ab etwa 1860) zum Einsatz kamen (Bild 1). Die Wirkung beruht auf der Änderung des Übergangswiderstands zwischen benachbarten Kohlekörnern, die zustande kommt, wenn die vom auftreffenden Schall bewegte Membran Druck darauf ausübt. Legt man eine Gleichspannungsquelle an die Mikrofonklemmen, so fließt ein Strom, der sich im Rhythmus der von der Membran aufgenommenen Schallwellen ändert (Bild 1 oben und Mitte).

### Energieumwandlung

Der Vorgang der Energieumwandlung gliedert sich bei Schallwandlern in zwei Teile:

#### Umwandlung von Schallenergie in mechanische Energie (oder umgekehrt)

Bei Schallsendern wird das mechanische System einschließlich Membran durch elektrische oder durch magnetische Kräfte in Schwingungen versetzt. Von der Energie der mechanischen Schwingungen soll dabei möglichst viel in Form von Schall abgestrahlt werden.

Bei Schallempfängern wird das mechanische System vom Schallfeld angeregt. Man unterscheidet dabei, ob die auf das mechanische System einwirkende Kraft unmittelbar vom Schalldruck  $p$  oder aber vom Schalldruckgradienten  $\text{grad } p$  (= Schalldruckgefälle) abhängt. Demzufolge spricht man entweder von einem (Schall-)Druckempfänger oder aber von einem (Schall-)Druckgradienten-Empfänger.

#### Umwandlung von mechanischer Energie in elektrische Energie (oder umgekehrt)

Für die Umwandlung von mechanischer in elektrische Energie (oder umgekehrt) gibt es verschiedene Möglichkeiten. Hinweisend auf die Art dieses zweiten Energieumwandlungsschrittes unterscheidet man elektroakustische Wandler nach demjenigen elektrischen oder magnetischen Vorgang, der entweder eine Kraft unmittelbar auf das mechanische System ausübt (Schallsender) oder umgekehrt durch die Bewegung



## Zur Information:

In leicht verständlicher Form wollen wir in den kommenden Ausgaben eine **Einführung in die Arbeitsgebiete der technischen Akustik – einschließlich Schwingungstechnik – und der Elektroakustik** vermitteln.

Diese Themengebiete werden wir beleuchten:

- Akustische Grundbegriffe – Schallfeldgrößen, Pegel, Resonatoren
- Schallausbreitung – Reflexion, Beugung, Brechung und Absorption
- Elektromechanische Analogien – Analogie erster und zweiter Art, Ersatzschaltbilder
- **Elektroakustische Wandler – Wandlerprinzipien und ihre Gesetze**
- Mikrofone – vom Studiomikrofon bis zum Subminiaturmikrofon
- Kopfhörer – elektrodynamische und elektrostatische Kopfhörer
- Lautsprecher – von den Anfängen bis zur Bassreflexbox
- Beschallungstechnik – gerichtete Schallabstrahlung, Linienstrahler
- Raum- und Bauakustik – sabinesches Gesetz, Nachhallzeit und äquivalente Absorptionsfläche
- Gehör – Lautstärke, Lautheit, Hörverlust, Hörgeräte, Audiometrie
- Persönlicher Schallschutz – von passiven Gehörschutzmitteln bis zum aktiven Schallschutz mittels „Antischall“
- Akustische Messräume – reflexionsarme Räume, Messboxen und Hallräume
- Körperschall und Vibrationen – Accelerometer und Ladungsverstärker
- Wasserschall – Schallausbreitung im Wasser, Hydrofone und Wasserschall-Messtanks
- Ultraschall und Infraschall – natürliche und industrielle Quellen

Theoretische Zusammenhänge werden nur so weit vertieft, wie es für das Verständnis des Stoffs notwendig ist. Auf mathematische Ausdrücke (Gleichungen, Formeln) wird im Text so weit wie möglich verzichtet. Anschauliche Illustrationen unterstützen diese Beiträge. Autor dieser Serie ist Prof. Dr.-Ing. Ivar Veit.

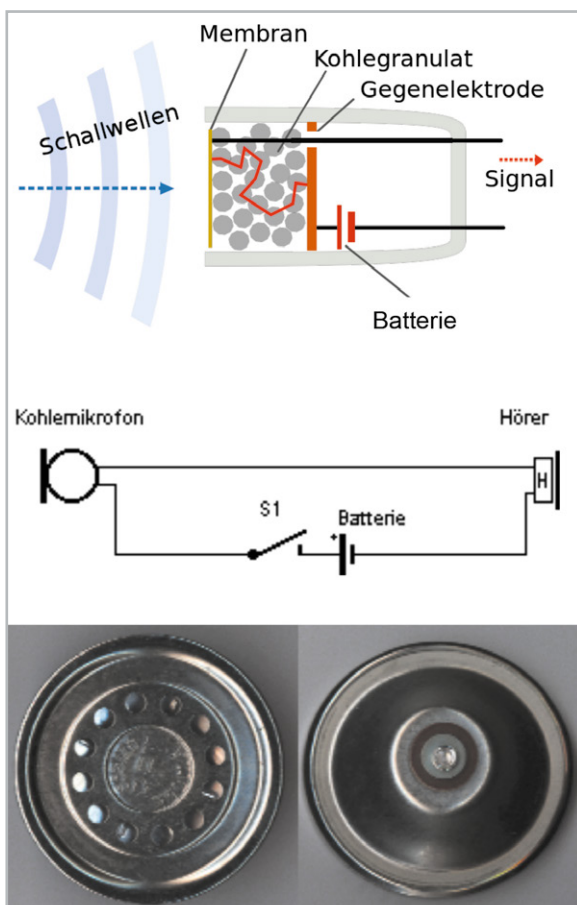


Bild 1: Kohlekörnermikrofon  
Oben: Funktionsprinzip  
Mitte: Kohlekörnermikrofon mit angeschlossenerm Hörer  
Unten: Ausführungsbeispiele früherer Kohlekörnermikrofone

des mechanischen Systems hervorgerufen wird (Schallempfänger). Diese Einteilung, nämlich nach der Art der mechanisch-elektrischen Umwandlung, kennzeichnet die Hauptmerkmale der verschiedenen Wandlerarten am besten. In der Praxis unterscheidet man daher zwischen elektromagnetischen, elektrodynamischen, magnetostriktiven, elektrostatischen und piezoelektrischen Schallwandlern.

### Reversible Schallwandler

Bei reversiblen Schallwandlern unterscheiden sich Schallsender von Schallempfängern im Prinzip lediglich durch das schottkysche Tiefen-Empfangsgesetz, siehe auch Bild 2. Danach kann tieffrequenter Schall besser empfangen als abgestrahlt werden.

Die meisten **elektroakustischen Wandler** können **reversibel** betrieben werden, d.h. als **Sender** oder auch als **Empfänger**. Den Zusammenhang zwischen beiden Betriebsarten beschreibt das schottkysche **Tiefen-Empfangsgesetz**: Tieffrequenter Schall kann wesentlich besser empfangen als abgestrahlt werden.

$$T_{\text{Sender}} \sim \omega \cdot T_{\text{Empfänger}} \quad \left( \omega = 2\pi f \right)$$

Darin sind

$$T_{\text{Sender}} = p/u \text{ (Pa pro V) = Sende-Übertragungsfaktor}$$

und

$$T_{\text{Empfänger}} = u/p \text{ (V pro Pa) = Empfangs-Übertragungsfaktor}$$



Bild 2: Das schottkysche Tiefen-Empfangsgesetz beschreibt den prinzipiellen Unterschied zwischen den Frequenzgängen von reversiblen Wandlern im Sende- und im Empfangsbetrieb.

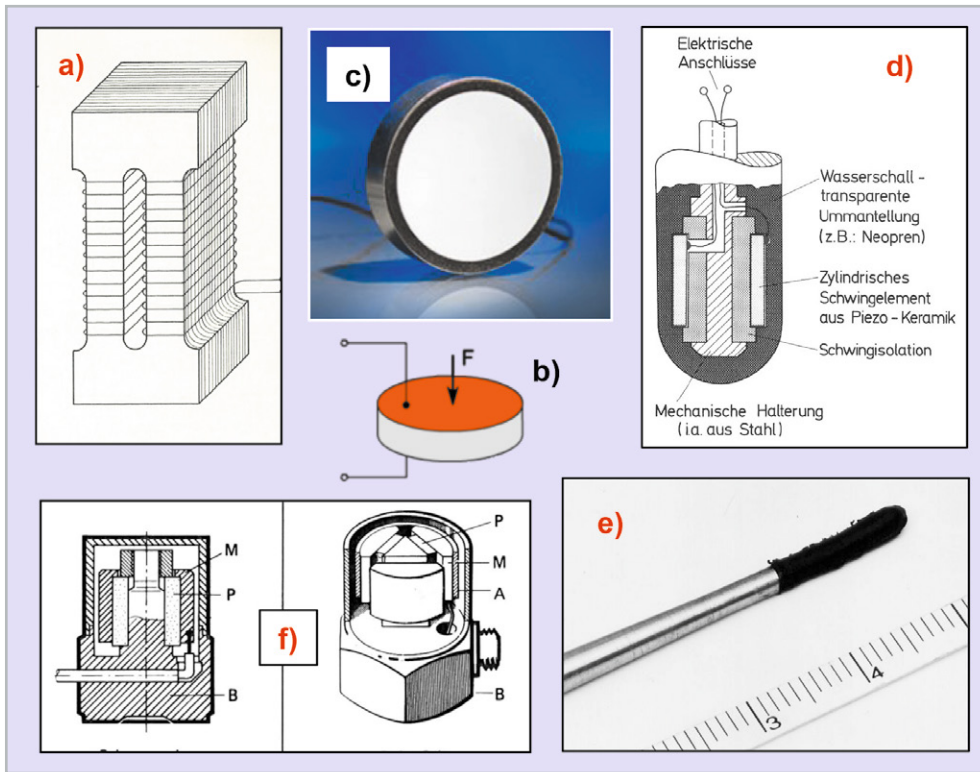


Bild 3: Schallwandler für Wasser- und Körperschall, die bis in den Ultraschallbereich hinauf verwendbar sind.

- a) Prinzipieller Aufbau eines magnetostruktiven Schwingelements  
 b) Piezokeramischer Dickenschwinger  
 c) Piezoelektrischer Ultraschallwandler  
 d) Aufbau eines piezoelektrischen Hydrofons mit einem Schwingelement aus PZT-Keramik (Bleizirkonattitanat)  
 e) Piezokeramisches Kleinsthydrofon für einen Frequenzbereich bis zu 600 kHz, dargestellt im Vergleich zu einem cm-Maßstab  
 f) Beschleunigungsaufnehmer zur Messung von Körperschall mit piezokeramischen Wandlerelementen (P) und seismischer Masse (M)

Darüber hinaus werden Schallempfänger noch danach beurteilt, welcher mechanischen Bewegungsgröße die erzeugte elektrische Größe entspricht. Das kann der Ausschlag  $x$  [Einheit: m (Meter)] oder die Wechselgeschwindigkeit bzw. Schnelle  $v$  [Einheit: m/s] sein. Entspricht die erzeugte elektrische Größe dem Ausschlag des mechanischen Systems, so spricht man von einem Elongationsempfänger (oder Elongationsmikrofon); folgt dagegen die elektrische Größe der Schnelle oder Schwinggeschwindigkeit des mechanischen Systems, so spricht man von einem Geschwindigkeitsempfänger (oder Geschwindigkeitsmikrofon). Bei Körperschallmikrofonen (= Beschleunigungsempfänger oder Accelerometer) entspricht die gemessene elektrische Größe der Schwingbeschleunigung  $a$  [Einheit: m/s<sup>2</sup>].

Im nachfolgenden Beitrag werden neben Mikrofonen auch Hydrofone und Beschleunigungsempfänger vorgestellt bzw. genannt, siehe dazu Bild 3.

Mit dem Aufkommen von leichter und somit ökonomischer herstellbarem piezokeramischen Material haben magnetostruktive Schallwandler an Bedeutung verloren. Letztere sollen hier dennoch nicht unerwähnt bleiben. Im Hinblick auf das Material haben sich im Laufe der Zeit beachtliche Weiterentwicklungen ergeben. Genannt sei z. B. der Einsatz von Elektretmaterial bei Mikrofonen oder die Entwicklung ganz neuen piezoelektrischen Materials (z. B. PVDF-Folie) für den Einsatz bei Schallwandlern.

Mit dem Aufkommen von leichter und somit ökonomischer herstellbarem piezokeramischen Material haben magnetostruktive Schallwandler an Bedeutung verloren. Letztere sollen hier dennoch nicht unerwähnt bleiben. Im Hinblick auf das Material haben sich im Laufe der Zeit beachtliche Weiterentwicklungen ergeben. Genannt sei z. B. der Einsatz von Elektretmaterial bei Mikrofonen oder die Entwicklung ganz neuen piezoelektrischen Materials (z. B. PVDF-Folie) für den Einsatz bei Schallwandlern.

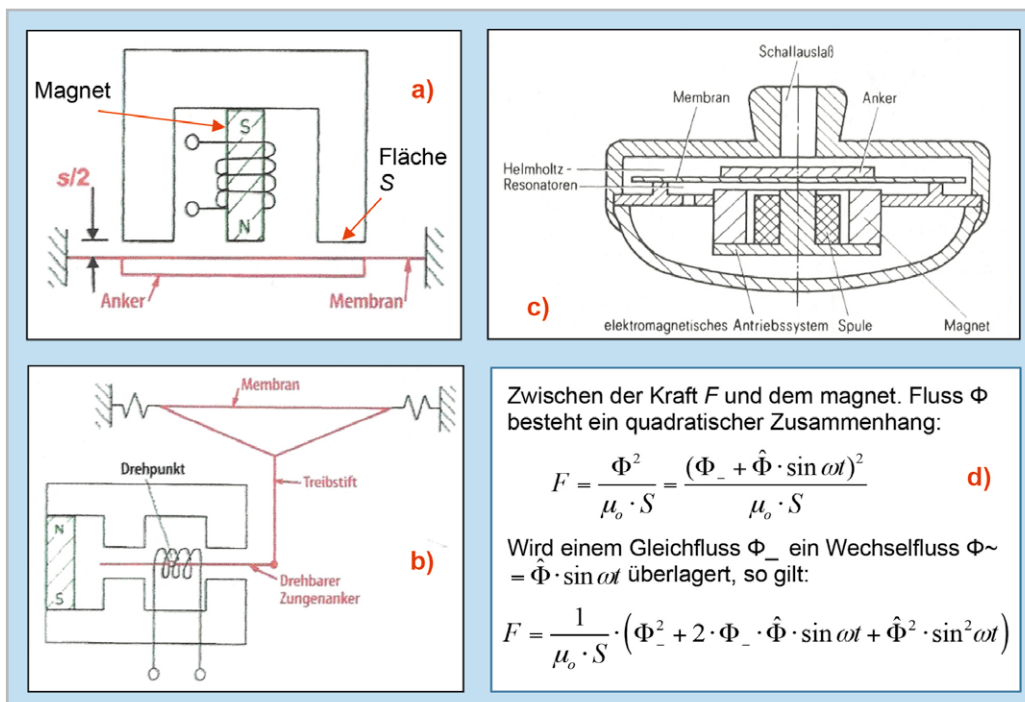


Bild 4: Grundsätzlicher Aufbau von elektromagnetischen Schallsendern, bestehend aus einem Permanentmagneten mit (mindestens) einer Wicklung und einem beweglichen Anker, der seinerseits mit einer Membran verbunden bzw. gekoppelt ist.

a) Rotationssymmetrischer Aufbau - elektromagnetische Mikrofone haben prinzipiell den gleichen Aufbau

b) Doppeljoch- oder magnetisches Vierpolsystem, bei dem sich ein drehbarer Zungenanker im Nullzweig einer magnetischen Brückenordnung befindet. Dabei kompensiert sich der magnetische Gleichfluss  $\Phi_-$  und geht gegen null, sodass der Anker aus sehr dünnem Material bestehen kann.

c) Aufbau eines elektromagnetischen Einsteckhörers, Durchmesser, z. B. 20 mm

d) Zusammenhang zwischen der Kraftwirkung  $F$  und dem verursachten magnetischen Fluss  $\Phi$ .  $S$  bedeutet hier die wirksame Fläche im Luftspalt, und  $\mu_0$  ist die Permeabilität des freien Raumes.



**Bild 5: Praktische Ausführung von elektromagnetischen Kleinsthörern**  
 Linkes Bild: Kleinsthörer (Abm.: 5,2 x 3,5 x 3 mm) mit zylindrischer Schallauftrittsöffnung  
 Rechtes Bild: Kleine Auswahl an neueren, elektromagnetischen Kleinsthörern mit verschiedenen Abmessungen, bis zu 5 x 2,73 x 1,93 mm herunter. In der gleichen Ausführung gab es in der Anfangszeit auch elektromagnetische Mikrofone für Hörgeräte. Später wurden diese abgelöst durch Kleinstmikrofone mit piezokeramischen Systemen und danach mit Elektret-Wandlersystemen. Rechts unten erkennt man einen vibrationsarmen Kleinsthörer, bestehend aus zwei separaten Hörsystemen mit einem gemeinsamen Schallauftritt.



## Wandlerprinzipien und ihre Gesetze

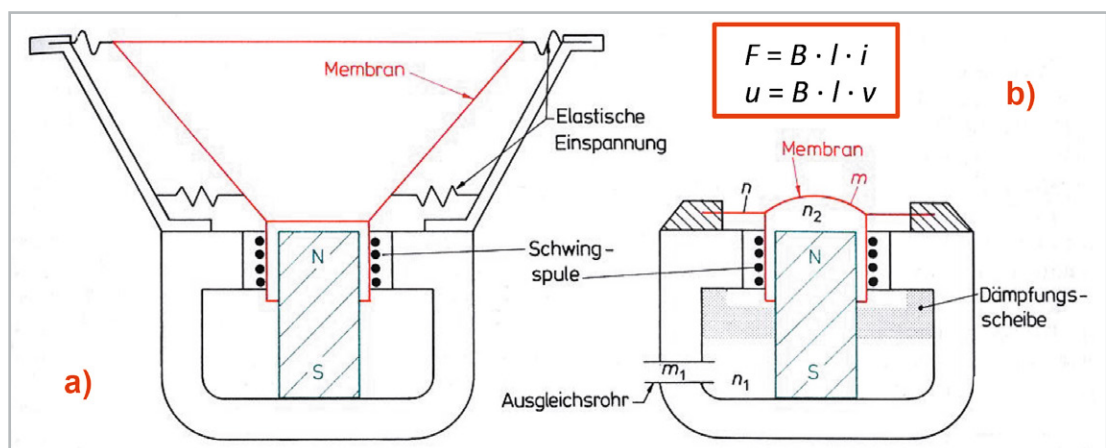
### Elektromagnetische Schallwandler

Das elektromagnetische Wandlerprinzip ist seit dem Jahr 1875 bekannt. Es geht auf Alexander Graham Bell (1847–1922) zurück. Elektromagnetische Schallwandler bestehen im Prinzip aus einem Permanentmagneten mit (mindestens) einer Wicklung und einem beweglichen Anker aus Weicheisen, der im Allgemeinen mit einer Membran mechanisch direkt verbunden bzw. gekoppelt ist. Die aus dem Magneten und dem Anker gebildete Anordnung stellt einen magnetischen Kreis dar, der durch einen Luftspalt von der Breite  $s = 2 \cdot s/2$  unterbrochen ist, siehe **Bild 4a**.

Zwischen der auf den Anker ausgeübten Kraft  $F$  und dem elektrischen Strom  $i$  durch die Wicklung, bzw. dem durch ihn erzeugten magnetischen Fluss  $\Phi$ , besteht ein quadratischer Zusammenhang, der die Ursache für nichtlineare Verzerrungen bildet, siehe dazu **Bild 4d**. Fließt durch die Wicklung ein Wechselstrom  $i$  mit der Frequenz  $f = \omega/2\pi$ , so erfolgt im zeitlichen Wechsel eine Anziehung und Abstoßung des Ankers und mit ihm auch der Membran mit einer sich periodisch ändernden Kraft. Der gesamte magnetische Fluss  $\Phi$ , der jetzt sowohl vom Permanentmagneten als auch von der stromdurchflossenen Wicklung herrührt, setzt sich infolgedessen aus einem Gleichfluss  $\Phi_{\sim}$  und einem Wechselfluss  $\Phi_{\sim}$  zusammen (**Bild 4d**). Die daraus resultierende Wechselkraft auf den Anker bzw. auf die Membran, beschreibt die zweite Gleichung im **Bild 4d**. Der erste Summand innerhalb des Klammersausdrucks stellt die konstante Anziehungskraft des Magneten dar. Der zweite Summand beschreibt die Wechselkraft, die sich mit der Frequenz  $\omega$  des Spulenstromes ändert. Der letzte Summand weist darauf hin, dass noch eine weitere Wechselkraft wirksam ist, die sich mit der doppelten (!) Frequenz  $2\omega$  [ $\sin^2\omega t = 0,5 \cdot (1 - \cos 2\omega t)$ ] ändert, und somit für die Entstehung nichtlinearer Verzerrungen verantwortlich ist.

Wählt man die Vormagnetisierung  $\Phi_{\sim}$  so hoch, dass  $\Phi_{\sim} \gg \Phi_{\sim}$  wird, so kann man die Verzerrungen verursachenden dritten Summanden in der genannten Gleichung vernachlässigen, und die Ankerbewegung erfolgt damit nur mit der Frequenz  $\omega$ .

**Bild 6: Praktische Ausführungen von elektro-dynamischen Schallwandlern, die im Wesentlichen aus einem feststehenden Permanentmagneten (mit einer Magnetfeld-Induktion  $B$ ) und einem darin beweglichen elektrischen Leiter (Leitertlänge:  $l$ ) bestehen, der in der Praxis meist zu einer (Schwing-)Spule aufgewickelt ist oder aber aus einer leichten Metallfolie besteht (Bändchenmikrofon). Die Schwing-spule ihrerseits ist mechanisch mit einer Membran fest verbunden.**  
 a) dynamischer Lautsprecher,  
 b) dynamisches (Tauchspul-) Mikrofon



Das **Bild 4b** zeigt den Aufbau eines Hörers mit einem magnetischen „Vierpolssystem“, wie er z. B. bei Hörgeräten zum Einsatz kommt. Bei dieser Konstruktion befindet sich ein drehbarer Zungenanker im Nullzweig einer magnetischen Brücken-„Schaltung“. Auf diese Weise wird der magnetische Gleichfluss durch den Anker zu null kompensiert und der Anker muss nur noch für den sehr viel kleineren Wechselfluss ausgelegt werden. Dadurch war es erst möglich, extrem kleine Hörerabmessungen zu realisieren.

Den Aufbau eines kleinen elektromagnetischen Einsteckhörers zeigt das **Bild 4c**, und zwar als Schnittzeichnung.

Praktische Ausführungen von kleinen elektromagnetischen Hörern zeigt das **Bild 5**. In der gleichen Größe gab es in der Anfangszeit der Hörgeräte auch elektromagnetische Mikrofone. Später wurden diese abgelöst von Kleinstmikrofonen mit piezoelektrischen Wandlersystemen. Danach folgten Elektretmikrofone, die es bis heute in extrem kleiner Ausführung gibt, und zwar als Druckmikrofone und als Druckgradienten-Mikrofone.

### Elektrodynamische Schallwandler

Wandler, die auf der Grundlage des elektrodynamischen Prinzips arbeiten, bestehen im Prinzip aus einem feststehenden, permanenten Magnetfeld und einem darin beweglichen elektrischen Leiter, den im Allgemeinen eine Schwing-spule bildet, die fest mit einer Membran verbunden ist. Wird der Leiter im Magnetfeld mit einer Geschwindigkeit  $v$  bewegt, so wird in ihm eine elektrische Spannung  $u$  induziert, siehe das Formelkästchen im **Bild 6**. Zwischen der induzierten Spannung  $u$  und der Geschwindigkeit  $v$  der Bewe-



gung besteht ein linearer Zusammenhang, was dieses Wandlerprinzip als verzerrungsarm auszeichnet. Die Formel  $u = B \cdot l \cdot v$  stellt das Empfängergesetz des elektrodynamischen Schallwandlers dar. Es bildet die Grundlage für alle elektrodynamischen Mikrofone.  $B$  bedeutet in dieser Formel die magnetische Induktion, und  $l$  ist darin die Leiterlänge. Das bekannteste Mikrofon, das nach diesem Prinzip arbeitet, ist das sogenannte Tauchspulmikrofon (siehe Bild 6b).

Um innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereichs nahezu frequenzunabhängige Übertragungseigenschaften zu erreichen, legt man zunächst die durch die Membranmasse  $m$  und die Nachgiebigkeit  $n$  gegebene mechanische Eigenresonanz des Mikrofonsystems in die Mitte des gewünschten Frequenzbereichs. Die davon herrührende Resonanzüberhöhung lässt sich durch einen optimal dimensionierten Reibungswiderstand (= Dämpfungsscheibe hinter der Schwingspule, z. B. aus Filz) dämpfen. Unterhalb und oberhalb dieser Eigenresonanz wird der Frequenzgang durch zusätzliche, geeignet abgestimmte Helmholtz-Resonatoren angehoben, sodass sich letztlich ein geradliniger Frequenzgang ergibt. Einen solchen Resonator für den Bereich unterhalb der Hauptresonanz ergibt z. B. die Hohlraumnachgiebigkeit  $n_1$  zusammen mit der Hohlraummasse  $m_1$  eines Verbindungsröhrchens von innen nach außen. Einen weiteren Resonator für den Bereich oberhalb der Hauptresonanz ergibt z. B. die Membranmasse  $m$  zusammen mit der Nachgiebigkeit  $n_2$  des Luftpolsters unterhalb der Membran.

Bild 6a zeigt den Aufbau eines elektrodynamischen Schallwandlers, hier eines Lautsprechers. Im Sendergesetz für den elektrodynamischen Schallwandler ( $F = B \cdot l \cdot i$ ) findet man das gleiche Produkt aus magnetischer Induktion und Leiterlänge wie im Empfängergesetz für elektrodynamische Wandler – ein typisches Kennzeichen für reversible Schallwandler. Sorgt man konstruktiv dafür, dass die Schwingspule auch bei den größten noch auszuführenden Amplituden im homogenen Teil des permanenten Magnetfeldes bleibt, so lassen sich nach diesem Wand-

lerprinzip besonders verzerrungsarme Schallwandler, z. B. Lautsprecher, realisieren.

### Magnetostriktive Schallwandler

Magnetostriktive Schallwandler haben heute an Bedeutung verloren. Der Vollständigkeit halber sollen sie dennoch nicht unerwähnt bleiben. Ferromagnetische Körper, z. B. ein Nickelstab, die in ein Magnetfeld gebracht werden, verkürzen sich, andere ferromagnetische Material wiederum werden länger. Diesen Effekt beobachtete erstmals J. P. Joule im Jahre 1847.

Die relativen Änderungen  $\Delta l/l_0$  sind zwar sehr klein, etwa um die  $10^{-6}$ , wohl aber sehr kraftvoll, was sie seinerzeit sehr bedeutsam werden ließ für den Aufbau von Wasserschallwandlern. Die Schallkennimpedanz  $Z_{0, \text{Wasser}}$  beträgt immerhin  $1,44 \cdot 10^6 \text{ Ns/m}^3$ . – In der jüngeren Vergangenheit fanden magnetostriktive Wandler (Bild 3a) unter anderem Verwendung in Ultraschall-Reinigungsgeräten für Brillen bei Optikern.

### Elektrostatische Schallwandler

Elektrostatische Wandler sind im Prinzip Kondensatoren, die aus einer sehr dünnen, schwingfähigen (Membran-)Elektrode und aus einer starren (Gegen-)Elektrode bestehen (Bild 7).

Elektrostatische Schallempfänger, darunter versteht man im Allgemeinen Kondensatormikrofone, gehören zu den mit am häufigsten verwendeten Mikrofonen in der Praxis. Von den elektrostatischen Schallsendern sind elektrostatische Kopfhörer besonders geschätzt, insbesondere wegen ihrer hohen Übertragungsqualität. Ihr Aufbau ist relativ einfach, dennoch sind sie infolge des höheren Betriebsaufwandes (zusätzliches Netzteil!) teurer als elektrodynamische Kopfhörer. Darauf wird in einer späteren Folge dieser Reihe noch näher eingegangen.

Die nachfolgenden Ausführungen beschränken sich auf die Behandlung von elektrostatischen Mikrofonen. Im Gegensatz zu dem von H. Sell seinerzeit (1937) geschaffenen elektrostatischen Mikrofon mit festem Dielektrikum arbeiten unsere heutigen Kondensatormikrofone mit Luft als Dielektrikum. Die elektrisch leitende, dünne Membran befindet sich in einem Abstand  $s$  von etwa 20 ... 25  $\mu\text{m}$  vor einer ebenen Gegenelektrode. Die Kapazität  $C$  dieser Anordnung beträgt je nach Ausführung 10 ... 200 pF. Sie wird über einen Widerstand  $R$  mit einer Polarisationsspannung  $U_-$  (150 ... 200 V) aufgeladen. Wird die Membran durch auftreffenden Schall bewegt, so entstehen im Rhythmus der Schallfrequenz Kapazitätsänderungen, die am Widerstand  $R$  einen Wechselspannungsabfall (= Mikrofon-Signalspannung) erzeugen, die nachfolgend nur noch verstärkt werden muss. Damit auch noch sehr

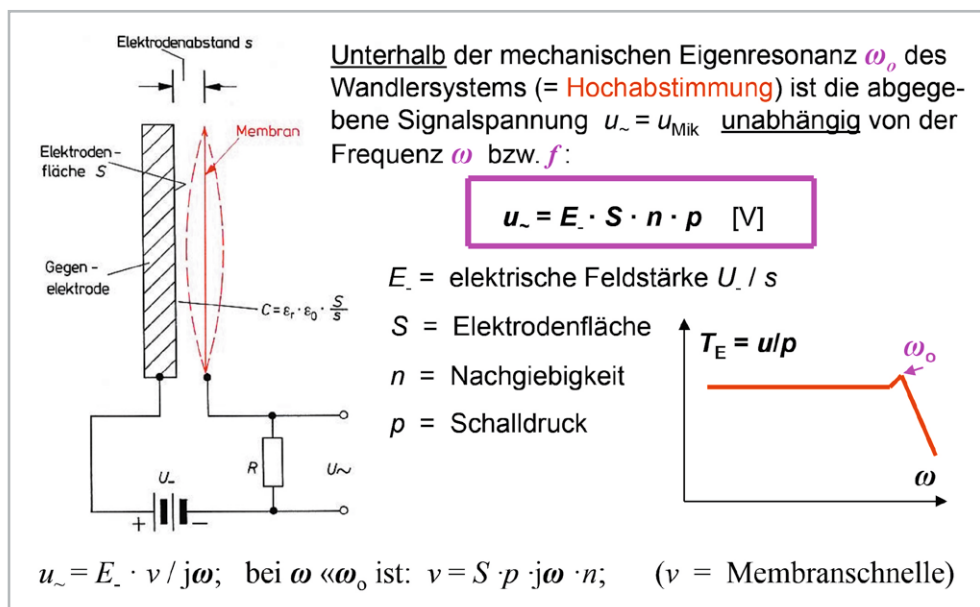
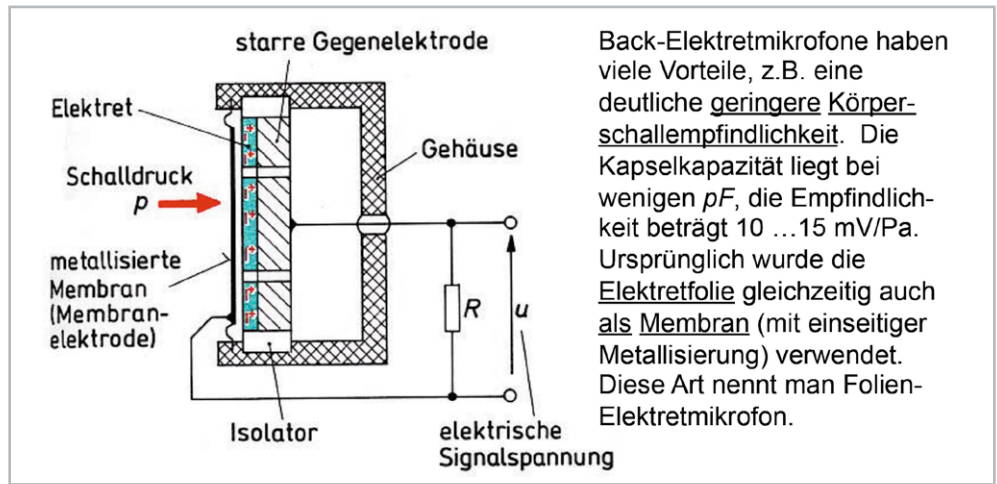


Bild 7: Funktionsprinzip eines elektrostatischen Mikrofons



Bild 8: Grundsätzlicher Aufbau eines Back-Elektret-Kondensatormikrofons. Die Elektretschicht ist hier auf der Gegenelektrode (Back Plate) aufgebracht. Sie ist zur besseren Veranschaulichung nicht maßstabsgerecht dargestellt. Ihre tatsächliche Dicke beträgt nur 15 ... 30  $\mu\text{m}$ . Rein begrifflich stellen Elektrete mit ihrem permanent vorhandenen elektrostatischen Feld ein sprachliches Pendant zu Magneten dar, die ein permanent vorhandenes Magnetfeld besitzen.



Back-Elektretmikrofone haben viele Vorteile, z.B. eine deutliche geringere Körperschallempfindlichkeit. Die Kapselkapazität liegt bei wenigen  $\text{pF}$ , die Empfindlichkeit beträgt 10 ... 15  $\text{mV/Pa}$ . Ursprünglich wurde die Elektretfolie gleichzeitig auch als Membran (mit einseitiger Metallisierung) verwendet. Diese Art nennt man Folien-Elektretmikrofon.

tiefe Frequenzen übertragen werden können, müssen der Widerstand  $R$  und der Eingangswiderstand  $R_{\text{Eingang}}$  des nachfolgenden Verstärkers sehr hochohmig sein ( $\geq 200 \dots 300 \text{ M}\Omega$ ). Um innerhalb eines vorgegebenen Frequenzbereichs frequenzunabhängige Übertragungseigenschaften zu erzielen, muss das Wandlersystem hochabgestimmt sein, siehe Bild 7. Mehr darüber in einem späteren Beitrag zum Thema Mikrofone.

Um zu immer kleineren Ausführungen von elektrostatischen Mikrofonen zu gelangen, musste man von der separat zuzuführenden Polarisationsspannung wegkommen. Diesem Wunsch kam die Entwicklung polarisierbaren Materials sehr entgegen. Es entstanden hochisolierende, polarisierbare Kunststofffolien (z. B. aus Teflon), sogenannte Elektrete, auch darüber wird in einem späteren Beitrag mehr berichtet. Hiermit konnten sehr kleine, Subminiatur-Kondensator-Mikrofone ge-

schaffen werden, die keine von außen zuzuführende Polarisationsspannung  $U_p$  mehr benötigten, siehe Bild 8.

### Piezelektrische Schallwandler

Um das Jahr 1880 beobachteten die Gebrüder Curie, dass bei der mechanischen Deformation bestimmter kristalliner Stoffe (Quarz) an deren Oberfläche elektrische Ladungen auftreten (direkter piezoelektrischer Effekt). Umgekehrt kann man einen solchen kristallinen Stoff durch Anlegen einer elektrischen Spannung auch mechanisch verformen (reziproker piezoelektrischer Effekt). Für elektroakustische Wandler verwen-

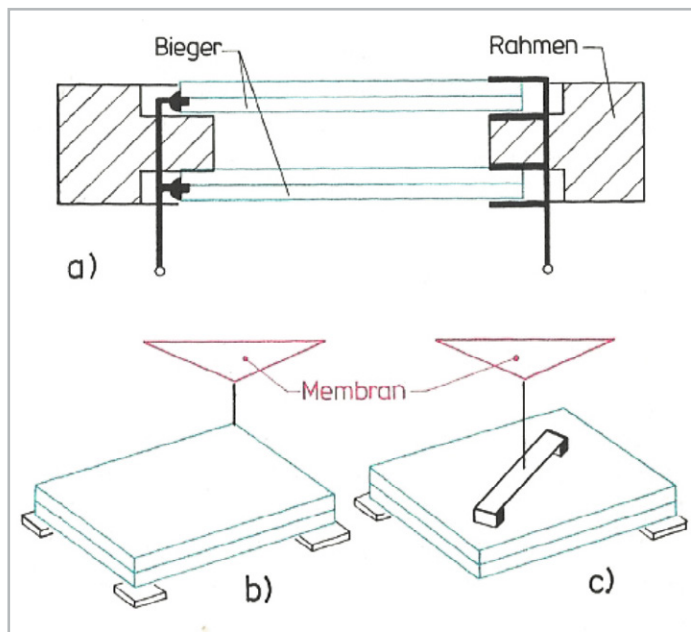


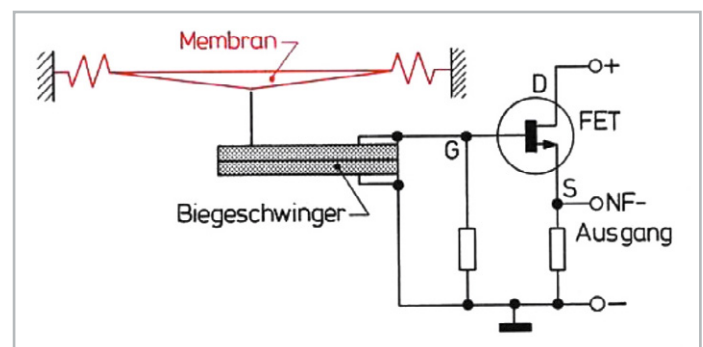
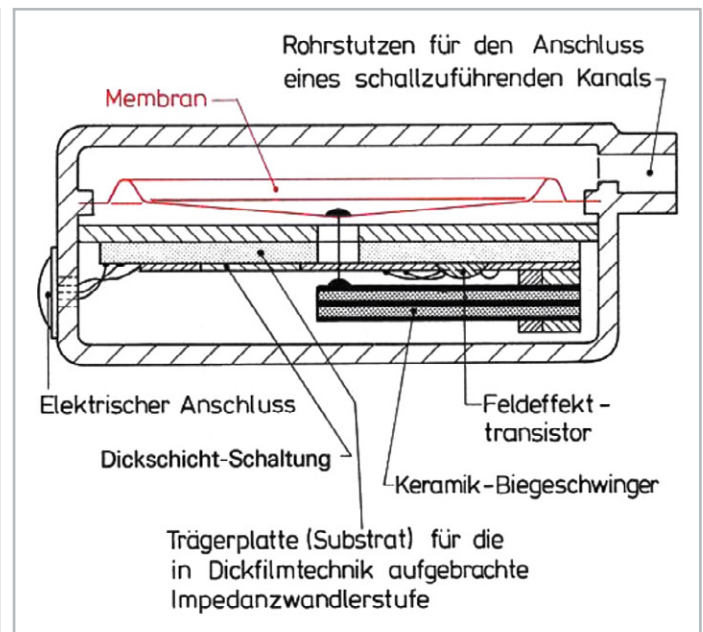
Bild 9: Piezokeramische Mikrofone

Oben links: Verschiedene Ausführungsformen von piezoelektrischen Schallempfängern:

a) Doppelklangzelle b) Biegeschwinger c) Sattelschwinger

Oben rechts: Piezokeramisches Kleinstmikrofon mit Biegeschwinger als Wandlerelement, aus der Anfangszeit dieser Wandlertechnik. Der Schalleinlass erfolgt hier über eine kanalartige Öffnung.

Unten rechts: Impedanzwandler mit Feldeffekttransistor, eingebaut im Wandlergehäuse. Wegen der hohen kapazitiven Impedanz des Piezoelements werden Keramikmikrofone stets unter Zwischenschaltung eines Impedanzwandlers an einen nachfolgenden Verstärker angeschlossen.



det man heute hauptsächlich piezokeramisches Material, z. B. Bariumtitanat oder Bleizirkonattitanat (PZT), das man in jeder gewünschten Form herstellen kann – ein großer Vorteil gegenüber kristallinen Stoffen.

Das Bild 9 zeigt verschiedene Ausführungsformen von piezoelektrischen Schallempfängern. Mit winzig kleinen Biegeschwingern aus Piezokeramik wurden

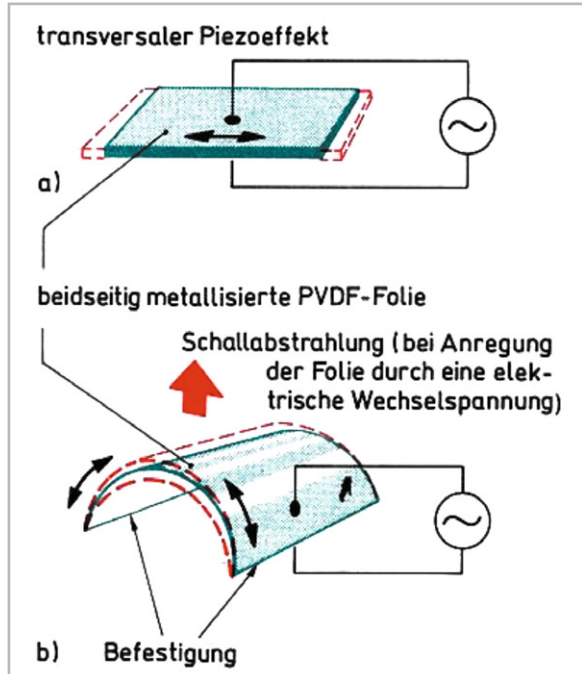


Bild 10: Beidseitig metallisierte PVDF-Folie, verwendet als Schallwandler. Um Schall abzustrahlen, muss der Folie lediglich eine gewölbte Gestalt gegeben werden, siehe Darstellung b).

**a) Elektromagnetische und elektrostatische Schallsender :**

$$F_{\text{magn.}} \sim \Phi^2 \sim i^2 \quad F_{\text{stat.}} \sim Q^2 \sim u^2$$

**b) Elektrodynamische Schallsender :**

$$F_{\text{dynam.}} \sim i$$

**c) Piezoelektrische Schallsender :**

$$F_{\text{piezo.}} \sim u$$

**d) Elektromagnetische und elektrodynamische Schallempfänger:**

$$u_{\text{magn./dynam.}} \sim v$$

**e) Elektrostatische und piezoelektrische Schallempfänger :**

$$u_{\text{stat./piezo.}} \sim x$$

Bild 11: Gesetzmäßigkeiten der verschiedenen Wandler-Prinzipien

$F$  = Schwingungskraft  
 $v$  = Schwingungsschnelle  
 $\Phi$  = Magnetischer Fluss  
 $Q$  = Elektrische Ladung  
 $i$  = (Wechsel-)Strom  
 $u$  = (Wechsel-)Spannung  
 $x$  = Schwingausschlag (-weg)

schon vor Jahren sehr kleine Mikrofone, z. B. für Hörgeräte, hergestellt.

Piezokeramik-Elemente bilden den Hauptbestandteil auch von Beschleunigungsaufnehmern (Accelerometer) oder auch von Hydrofonen (Wasserschallmikrofone), siehe dazu auch Bild 3.

In jüngerer Zeit sind die piezoelektrischen Materialien um eine neue Werkstoffvariante bereichert worden. Es handelt sich dabei um ganz bestimmte, polarisierbare Kunststoffe. Der bekannteste davon ist das Polyvinylidenefluorid (PVDF). Beidseitig metallisiert können Piezopolymerfolien zum Aufbau von elektroakustischen Wandlern verwendet werden. Im Niederfrequenzbereich zeigt dieses Material allerdings nur den transversalen Piezoeffekt. Um damit dennoch eine schallwandelnde Wirkung zu erreichen, gibt man der Folie eine gewölbte Gestalt, sodass die Längsbewegung der Folie in eine Querbewegung umgewandelt wird, siehe Bild 10. Im Ultraschallbereich zeigen PVDF-Folien den longitudinalen Piezoeffekt, das Material schwingt hier in Richtung des angelegten elektrischen Feldes.

### Grundlegende Unterschiede bei den verschiedenen Wandlengesetzen

Elektromagnetische und elektrostatische Schallsender arbeiten nach quadratischen Kraftgesetzen (Bild 11a), was vom Prinzip her nichtlineare Verzerrungen verursacht. Um das zu vermeiden oder auf ein Mindestmaß zu beschränken, ist eine Vorpolarisierung erforderlich, und zwar mittels eines permanenten Magnetfeldes bzw. eines permanenten elektrostatischen Feldes. Für elektrodynamische und piezoelektrische Schallsender gelten lineare Kraftgesetze (Bild 11b und 11c).

Die von Schallempfängern abgegebene Signalspannung  $u$  folgt entweder der zeitlichen Auslenkung  $x(t)$  oder aber der Schwingungsschnelle  $v(t)$  der vom auftretenden Schall zu Schwingungen angeregten Membran. Im ersten Falle spricht man von Elongationsempfängern (Bild 11e) und im zweiten von Geschwindigkeitsempfängern (Bild 11d).

### Ausblick

Nach der Behandlung der verschiedenen Wandlerprinzipien und ihrer Funktionsgesetze im vorliegenden Beitrag wird im nachfolgenden fünften Teil ausführlich auf das Thema Mikrofone eingegangen. Wichtige Anforderungen, die ein gutes Mikrofon erfüllen sollte, sind neben einem guten Übertragungs-Frequenzgang vor allem auch eine dem vorgesehenen Einsatz entsprechende Richtcharakteristik. Besonders bei Mikrofonen, die für die Aufnahme und Übertragung von Sprache und/oder Musik vorgesehen sind, haben diese beiden Eigenschaften eine sehr hohe Priorität. Im nächsten Beitrag wird daher ausführlich darauf eingegangen, welche konstruktiven Maßnahmen dazu beitragen, dass Mikrofone die an sie gestellten Anforderungen erfüllen. Dazu gehören auch die messtechnischen Mittel, vor allem die Messmikrofone (feststehend oder rotierend), die den messbaren Nachweis erbringen. Auch darüber wird im nächsten Teil der Artikelserie berichtet.